



# 基于 GIS 空间分析的抛石护岸工程 水下抛石效果评价\*

罗 青, 赵 钢, 王茂枚, 蔡 军, 陈 楠, 周广宇

(江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 抛石护岸工程水下抛石效果评价是工程水下质量控制的重点和难点。准确掌握和分析工程水下质量状况, 对确保抛石护岸的施工质量起到了重要作用。GIS(地理信息系统)技术拥有强大的空间数据处理与分析能力, 可用于对水下抛石效果进行多维度的定性与定量分析。分析结果可以准确评价施工质量、精准指导下一阶段施工、降低施工成本。通过对 3 个试验区的分析, 总结出一般施工规律: 1) 由于工程区上游起始处以及下游深水侧容易产生冲刷, 抛石效果较差。2) 工程区中部及近岸区抛石效果较好, 但容易过抛。

**关键词:** GIS(地理信息系统); 空间分析; 抛石护岸工程; 质量检测; 多波束测深系统

**中图分类号:** TV 523; U 656

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)02-0182-06

## Evaluation of underwater ripple effect for riprap revetment project based on GIS spatial analysis

LUO Qing, ZHAO Gang, WANG Mao-mei, CAI Jun, CHEN Nan, ZHOU Guang-yu  
(Jiangsu Provincial Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** The evaluation of the underwater riprap effect for the riprap revetment project is the key and difficult point of the underwater quality control of the project. Accurately grasping and analyzing the underwater quality status of the project has played an important role in ensuring the construction quality of the riprap revetment project. GIS (geographic information system) technology has powerful spatial data processing and analysis capabilities, which can be used for multi-dimensional qualitative and quantitative analysis of the underwater riprap effect. The analysis results can accurately evaluate the construction quality and guide the next stage of construction, and reduce construction costs. By the analysis of the three test areas, we summarize the general construction rules: 1) The upstream start in the project area and the deep water side of the downstream are prone to scour, and the riprap effect is poor. 2) The riprap effect of the middle in the project area and the near-shore area is better, but these areas are also prone to excessive construction.

**Keywords:** GIS(geographic information system); spatial analysis; riprap revetment project; quality detection; multi-beam bathymetry system

抛石护岸工程是崩塌岸坡加固治理施工的重要措施, 对江河的河势稳定及堤防安全具有积极作用<sup>[1-2]</sup>。作为水下隐蔽工程, 抛石护岸工程水下

抛石效果评价是工程质量控制的重点和难点, 准确掌握和分析工程水下质量状况对确保抛石护岸的施工质量起到了重要作用。目前, 工程水下抛

收稿日期: 2020-05-12

\*基金项目: 江苏省水利科技项目(2017009); 江苏省水利科技项目(2018005); 江苏省科技厅创新能力建设计划—省属公益类科研院所自主科研经费项目(BM2018028)

作者简介: 罗青(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事水下测绘研究。

石效果评价使用的是断面法,但断面法具有局限性,随机选取的断面使施工质量评价结果不唯一,并且断面法检测分析方法没有发挥出多波束全覆盖和高分辨率的优势<sup>[3]</sup>。针对断面法的缺陷,有少数学者尝试将空间分析技术应用到护岸抛石效果分析中,例如李明益<sup>[4]</sup>将GIS技术应用在护岸抛石效果分析中,重点对比了断面分析与GIS分析的区别,研究表明GIS分析结果具有唯一性,避免了断面法分析统计结果不一致产生的纠纷,但该研究没有对抛石增厚的空间分布进行分析,也没有对抛石均匀度进行评价。作为一门新兴的技术,GIS随着计算机技术、通信技术的发展而迅速发展,GIS系统支持空间数据的采集、存储、管理、处理、分析、建模和显示,可以解决复杂的空间问题<sup>[5]</sup>。地理空间数据经过GIS的空间分析和可视化技术处理,可以对地理空间的信息演变和地理价值做出分析和挖掘,广泛应用于军事、交通、电力、水利等众多领域<sup>[6]</sup>。因而本文尝试利用GIS空间分析功能去处理和分析抛石护岸工程多波束检测数据,充分利用高分辨率的多波束点云数据,对抛石护岸工程水下抛石效果评价的抛足、抛准与抛匀指标进行定性与定量分析,深度挖掘抛石的空间信息,精确计算与展示施工后水下抛石增厚的空间分布情况,为抛石护岸工程水下质量评价、施工指导提供完善与准确的数据支撑,以期更好地为施工提供服务,为解决抛石护岸工程水下隐蔽工程质量控制的重点和难点问

题提供一定的科学参考。

1 方案设计

1.1 工程区概况

在长江江苏段选择了3个抛石研究区,分别位于南京河段、镇扬河段和澄通河段。1)研究区1位于南京河段梅子洲汉道,梅子洲河道深泓摆动幅度趋小,两岸岸线基本保持稳定,河床冲淤幅度较小,深槽的横向变化也较小,但岸坡相对较陡,是长江下游重点防护岸段。研究区1长约440 m、宽约20 m、面积约9 000 m<sup>2</sup>,划分成5个单元工程(单元工程用DQ表示),设计抛厚1.2 m。2)研究区2位于镇扬河段的六圩弯道,具有较明显的弯道水流河床演变特征,即凹岸冲刷、凸岸淤积,由于主流长期贴凹岸,左岸近岸河床冲深,岸坡较陡,是长江下游重点防护岸段。研究区2长约750 m、宽约40 m、面积约3万m<sup>2</sup>,划分成10个单元工程,其中DQ1~DQ5设计抛厚1.0 m,DQ6~DQ10设计抛厚0.8 m。3)研究区3位于澄通河段福姜沙右汉道,属长江下游典型的鹅头型汉道,汉道进口缩窄,河槽总体向窄深型发展,弯顶区域迎流顶冲,河床边坡较陡,是长江下游重点防护岸段。研究区3长约430 m、宽约60 m、面积约2.6万m<sup>2</sup>,划分成8个单元工程,其中DQ1~DQ4设计抛厚1.5 m、DQ5~DQ8设计抛厚2.0 m。图1为上述研究区位置。

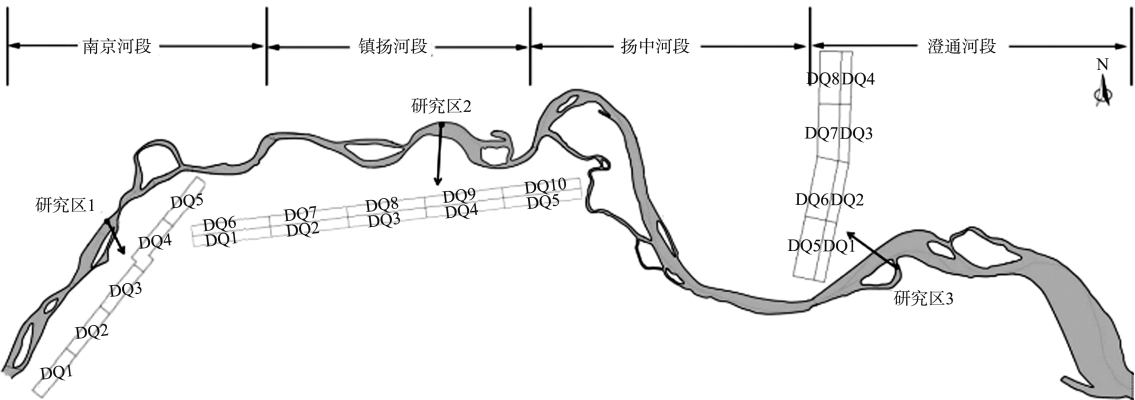


图1 研究区位置

1.2 研究方案

使用 R2SONIC2024 多波束测深系统(用于 2~500 m 深度的水域,量程分辨率 1.25 cm)对研究区施工前、后两个阶段进行全覆盖扫测。利用 ArcGIS 软件对研究区施工前、后两期多波束点云数据进行空间插值获取高精度栅格数据,对两期栅格进行叠置分析,获取抛石增厚空间分布数据。对抛石增厚空间分布数据进行聚合分析、统计分析、栅格计算等一系列 GIS 空间分析,深入挖掘数据信息,划分抛石增厚率等级,获取抛石增厚不合格区域的空间分布图,定性、定量评价单元工程抛石均匀度与施工质量,同时获取需补抛的土石方量与空间分布信息,为后续施工提供精准指导,为弥补施工缺陷、降低施工成本提供技术支撑。

2 数据分析

2.1 抛石增厚空间分析

由于栅格形式的 GIS 数据非常适合空间分析,因而通常把矢量数据转化成栅格数据<sup>[7]</sup>,将施工前、后的多波束点云数据分别进行空间插值,对两期的插值数据进行空间叠置计算,获取抛石增厚数据(图 2)。由于施工是一个动态的过程,研究区不仅受到抛石施工的影响,还受到水流的冲刷,即使抛投了足量的块石,也可能得不到理想的增厚,往往需要二次甚至多次返工补抛。由图 2 可见,研究区 1 和研究区 2 上游以及下游深水侧部分区域存在较明显冲刷;研究区 3 在抛石时因为设置了足够的前置抛投距离,所以上游没有明显冲刷,但下游深水侧部分区域存在明显冲刷。3 个研究区中部区域有明显增厚,但分布不均匀。

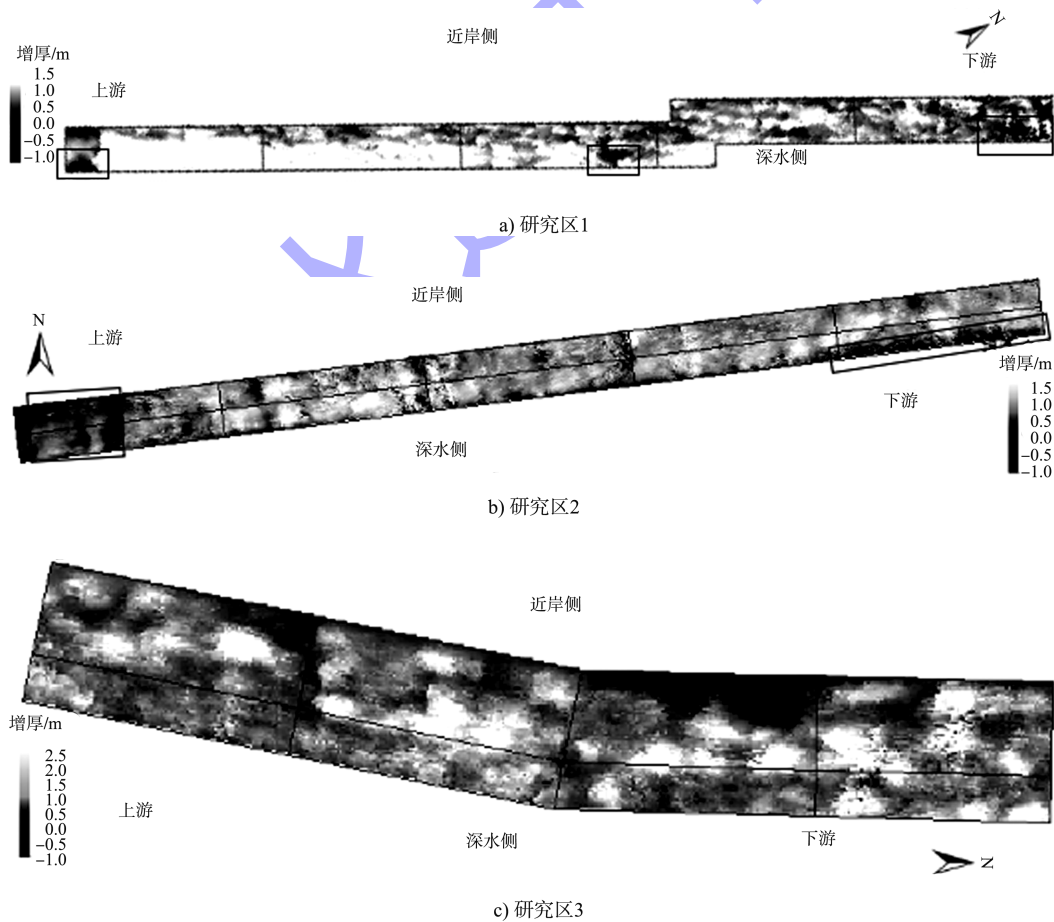


图 2 研究区抛石增厚空间分布

为了更进一步挖掘抛石增厚空间信息,将各个研究区的绝对增厚值按照设计增厚的增厚率进

行聚合分析,从聚合结果可以直接了解研究区抛石增厚率的空间分布情况,根据规范<sup>[8]</sup>断面增厚

率到 70%(急流区域 65%)的视为施工合格,以此标准判断区域增厚是否合格。由图 3 可见抛石合格区域主要分布在工程区中部,研究区上游起始处以及下游深水侧区域抛石效果较差,甚至存在较明显冲刷,施工时,应格外关注这些区域。通

过空间查询可以提取出研究区各种抛石增厚率的空间分布图,对这些缺陷区域重新划分施工区,精准指导补抛工作。图 4 为 3 个研究区提取出来的冲刷区域空间分布。

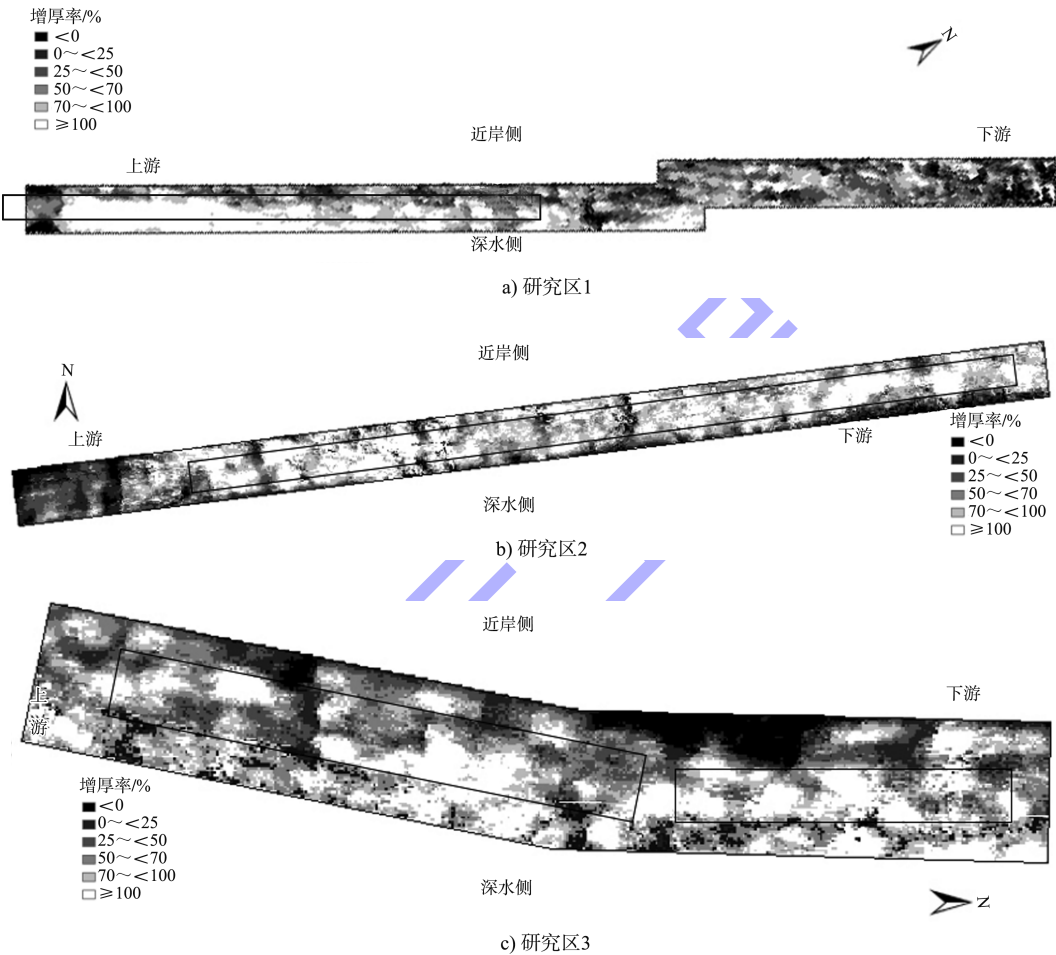
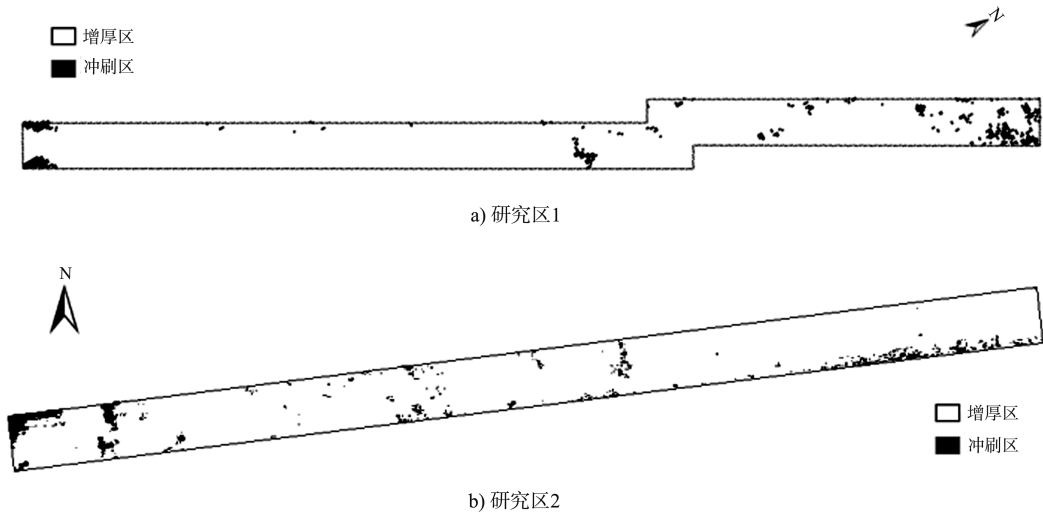


图 3 研究区抛石增厚率空间分布





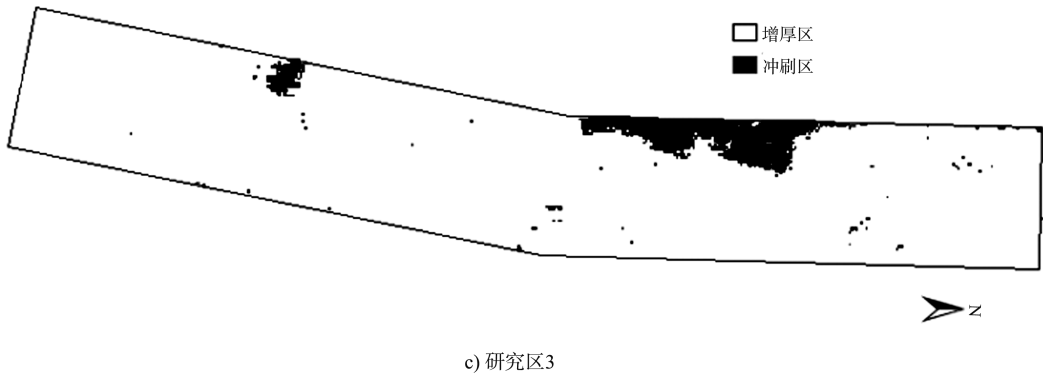


图 4 研究区冲刷区空间分布

对抛石增厚进行统计分析，定量研究抛石增厚情况，由表 1 可见，3 个研究区分别冲刷 4.0%、4.4%和 5.7%。由图 4 可知，冲刷区域主要集中于研究区上游起始处以及下游深水侧，这也是抛石增厚效果较差的相对集中区域。故在施工中，需要重点关注这些区域，尤其抛石起始处应该设定一个前置抛投距离。

表 1 研究区 2 抛石增厚率占比

增厚率/ %	研究区 1		研究区 2		研究区 3	
	面积/ m <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ m <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ m <sup>2</sup>	占比/ %
<0	361	4.0	1 313	4.4	1 485	5.7
0~<25	780	8.7	2 547	8.5	1 921	7.4
25~<50	1 767	19.6	3 908	13.0	4 476	17.2
50~<70	1 776	19.7	4 339	14.4	6 136	23.6
70~<100	2 003	22.3	7 925	26.3	5 168	19.8
≥ 100	2 313	25.7	10 012	33.4	6 849	26.3

利用 GIS 三维分析计算出研究区不合格区域面积以及缺省的块石方量(表 2)。根据块石方量合理准备块石，根据不合格区域的空间信息，指导施工、实现精准抛石、减少施工成本。

表 2 研究区补抛块石方量

研究区	设计高程/m	不合格面积/m <sup>2</sup>	补抛方量/m <sup>3</sup>
1	1.2	3 630.51	3 501.37
2	0.8	4 476.27	1 215.98
	1.0	6 520.29	2 119.47
3	1.5	3 004.43	804.02
	2.0	10 426.50	8 018.62

2.2 抛石均匀度分析

由于水下抛石是隐蔽工程，施工难度较大，

抛投位置控制不够精确再加上水流影响，抛石增厚通常是不均匀的。通过抛石增厚空间分析结果对抛石的均匀程度有了直观的了解，在此基础上通过空间分析，对每个单元工程抛石增厚的均匀度进行定量分析。据研究，抛石增厚的空间分布均匀度适合使用相对性指标衡量，推荐将离差系数  $C_v$  和克里斯琴森均匀系数  $CU$  作为抛石均匀度衡量指标。

离差系数 $C_v$ 为抛石增厚的标准差与抛石增厚的均值之比。 $C_v$ 值越大，则抛石增厚值的离散程度越大，即抛石增厚值与均值差异越大； $C_v$ 值越小，则抛石增厚的离散程度越小，即抛石增厚值与均值差异越小。

克里斯琴森均匀系数  $CU$  是 Christiansen 于 1942 年提出的描述农业喷灌水量分布均匀程度的定量指标，广泛应用于各个领域。它描述的是农田喷灌系统中各测点水深与平均水深偏差的绝对值之和，可以较好地表征整个田间水量分布与平均值偏差的情况<sup>[9]</sup>，本文用该指标衡量抛石增厚是否均匀， $CU$  越大，表明抛石增厚均匀，反之抛石增厚不均匀。

利用 GIS 的数据统计与空间计算功能，计算出 3 个研究区每个单元工程的均匀度指标(表 3)，将 $C_v\leq 0.5$ 且  $CU>60\%$ 的单元工程视为抛石相对均匀的区域，其中研究区 1 的第 2 单元工程、研究区 2 的第 4、9、10 单元工程以及研究区 3 的第 1、2、3、4 单元工程抛石相对比较均匀。

表 3 研究区单元工程均匀度分析

研究区	单元工程序号	$C_v$	$CU/\%$	平均 增厚/m	设计 增厚/m
1	1	0.56	54.9	1.20	1.2
	2	0.44	65.0	1.06	1.2
	3	0.56	57.3	0.79	1.2
	4	0.53	58.8	0.78	1.2
	5	0.92	33.5	0.53	1.2
2	1	0.67	47.5	0.46	1.0
	2	0.52	61.5	0.99	1.0
	3	0.55	60.0	0.75	1.0
	4	0.48	63.9	0.85	1.0
	5	0.81	35.0	0.64	1.0
	6	1.19	6.8	0.36	0.8
	7	0.54	57.9	0.83	0.8
	8	0.55	62.8	0.73	0.8
	9	0.47	69.7	0.79	0.8
	10	0.44	68.0	0.84	0.8
3	1	0.39	69.8	1.20	1.5
	2	0.38	69.7	1.48	1.5
	3	0.49	62.4	1.26	1.5
	4	0.47	63.2	1.59	1.5
	5	0.64	52.2	1.27	2.0
	6	0.54	55.9	1.45	2.0
	7	1.49	-15.2	0.83	2.0
	8	0.60	52.6	1.50	2.0

单元工程划分的大小会影响抛石均匀度的分析结果,可以制定相应的划分标准。也可以对整个研究区域进行均匀度评价,但研究区如果存在冲刷或过抛现象会急剧降低研究区的均匀度。

2.3 抛石施工质量评价

根据规范,工程质量评价合格的依据是检测点增厚值达到设计值的 75%(水深流急区 70%)、断面增厚值(断面测点增厚值的平均值)达到设计值的 70%(水深流急区 65%)。利用 GIS 三维空间分析功能查询出每个单元工程增厚值大于等于设计值的 75%的面积,该面积视为研究区合格面积,如果合格面积占单元工程总面积超过 70%,即该单元工程合格,统计结果见表 4。研究区 1 下游的单元工程 5、研究区 2 上游的单元工程 1 和 6 以及下游深水侧的单元工程 5、研究区 3 上游的单元工程 1 以及下游深水侧的单元工程 7 抛投效果差且不均匀。抛石效果相对较好的单元工程多集中于研究区中部以及近岸的部分单元工程,比如研究区 2 的第 7、8、9、10 单元工程,研究区 3 的第 2、4 单

元工程,但需要注意研究区中部容易过抛。

表 4 研究区单元工程合格信息统计

研究区	单元工程序号	合格 面积/m <sup>2</sup>	合格面 积占比/%	单元工程 合格判定
1	1	1 174.00	66.7	不合格
	2	1 106.00	62.8	不合格
	3	660.00	37.5	不合格
	4	712.00	36.3	不合格
	5	312.00	17.7	不合格
2	1	629.54	21.0	不合格
	2	2 277.41	75.9	合格
	3	1 725.41	57.5	不合格
	4	2 027.96	67.6	不合格
	5	1 366.93	45.6	不合格
	6	979.80	32.7	不合格
	7	2 178.56	72.6	合格
	8	2 119.85	70.7	合格
	9	2 280.22	76.0	合格
	10	2 414.45	80.5	合格
3	1	1 349.32	58.7	不合格
	2	1 757.88	76.4	合格
	3	1 204.74	55.8	不合格
	4	1 463.13	73.4	合格
	5	1 719.76	37.4	不合格
	6	2 120.55	46.1	不合格
	7	1 212.70	29.6	不合格
	8	1 971.66	49.5	不合格

由于 GIS 空间分析已经将判定标准由点、线扩展至面,利用的数据更全面、更准确,评价时可适当降低评价标准。

3 结论

- 1)施工区上游工程起始处以及下游深水侧的区域容易被冲刷,抛石效果较差,建议施工时重点关注,同时需要设定一个前置抛石距离。
- 2)工程中部及近岸区域抛石效果相对较好,但容易过抛。
- 3)GIS 空间分析功能强大,充分利用了多波束点云数据,从抛足、抛准、抛匀等角度分析了抛石情况。一方面检测结果更直观、更准确,提高了质量评定精度;另一方面可以准确定位施工缺陷区域,获取缺省抛石方量,实现施工的精准指导,最大程度降低施工成本。
- (下转第 198 页)